中国生态农业学报 2016 年 9 月 第 24 卷 第 9 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Sep. 2016, 24(9): 1196−1205

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.151325

不同生育期调亏灌溉对酿酒葡萄耗水及果实品质的影响*

邓浩亮[1] 孔维萍[2] 张恒嘉[1**] 李福强[1]

(1. 甘肃农业大学工学院 兰州 730070; 2. 甘肃省玉门市水务局 玉门 735200)

摘 要 不同程度的土壤干旱对酿酒葡萄的果实品质、产量和水分利用效率具有显著影响。明晰不同生育阶段干旱胁迫效应对酿酒葡萄土壤水分精准化管理和节水灌溉方案的制定具有重要的意义。本文于 2014 年在河西走廊中东部武威市凉州区清源镇威龙葡萄园产区开展了酿酒葡萄不同生育期、不同干旱胁迫程度的试验研究。在保持其他生育期土壤水分为正常灌溉(土壤水分阈值 70%~75%)的情况下，在葡萄的萌芽期、抽蔓期、开花期、浆果膨大期和着色成熟期分别进行中度(土壤水分阈值 60%~65%)和重度(土壤水分阈值 50%~55%)的干旱处理，同时增设浆果膨大期的充分灌溉(土壤水分阈值 80%~85%)处理，以全生育期的正常灌溉(土壤水分阈值 70%~75%)作为对照，进行葡萄耗水特征和产量品质的测定。试验结果表明：不同处理土壤含水量垂直变化趋势一致，随土壤深度增加土壤含水量呈持续递增趋势；随着土壤深度递增，调亏灌溉对土壤含水量的影响越来越弱；40~60 cm 土壤剖面，调亏处理含水量较对照减少幅度最大；浆果膨大期土壤剖面内含水量均低于其他生育期。不同处理酿酒葡萄耗水强度随时间变化趋势一致，萌芽期日耗水强度最小，为 0.13~0.33 $mm \cdot d^{-1}$，而浆果膨大期耗水强度最大，为 2.30~4.09 $mm \cdot d^{-1}$。萌芽期中度胁迫处理酿酒葡萄产量和水分利用效率最高，分别达到 15 228 $kg \cdot hm^{-2}$ 和 3.62 $kg \cdot m^{-3}$；浆果膨大期充分灌溉处理次之，而浆果膨大期重度胁迫处理最低，仅分别为 7 128 $kg \cdot hm^{-2}$ 和 2.26 $kg \cdot m^{-3}$。着色成熟期中度胁迫下，酿酒葡萄花青苷、还原糖、单宁、总酚含量比生育期正常供水处理高 2.7%、6.56%、17.91%和 23.23%，且有效抑制可滴定酸积累($P<0.05$)，而其他处理与对照之间品质指标差异不显著。综合考虑产量、水分生产效率及果实品质等指标，最佳酿酒葡萄水分调控处理为着色成熟期中度胁迫，即着色成熟期土壤相对含水率为 60%~65%、其余生育期土壤相对含水率为 70%~75%。由此可见，在酿酒葡萄栽培时适时、适度的调亏灌溉既能显著提高水分生产效率，实现节水、高效用水的目的，又能提高果实品质，对河西走廊地区酿酒葡萄种植具有重要的意义。

关键词 调亏灌溉 干旱胁迫 耗水规律 产量 水分生产效率 品质 酿酒葡萄
中图分类号: S663.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)09-1196-10

Effect of regulated deficit irrigation at different growth stages on water consumption and fruit quality of wine grape*

DENG Haoliang[1], KONG Weiping[2], ZHANG Hengjia[1**], LI Fuqiang[1]

(1. School of Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;
2. Water Supplies Bureau of Yumen City, Yumen 735200, China)

Abstract Soil drought notably influences fruit quality, yield and water use efficiency of wine grape. It is therefore important to clarify the effect of drought stress at different growth stages on soil water precision management and water-saving irrigation schedules in wine grape fields. To explore this effect, an experiment was carried out in 2014 at Weilong vineyard in Qingyuan Town in Liangzhou District, which belongs to Wuwei City in Hexi Corridor. The study evaluated the effects of drought stress caused by regulated deficit irrigation at different growth stages on water consumption and fruit quality of vine grape. In the experiment, 12

* 甘肃省高等学校基本科研业务费项目(2012)资助
** 通讯作者：张恒嘉，主要从事农业水土工程与农业生态研究。E-mail: zhanghj@gsau.edu.cn
邓浩亮，主要从事北方旱区作物节水技术及装备工程研究。E-mail: denghaoliang521@163.com
收稿日期: 2015−12−16 接受日期: 2016−03−31

* The study was supported by the Fund of Basic Scientific Research of University of Gansu Province of China (2012).
** Corresponding author, E-mail: zhanghj@ gsau.edu.cn
Received Dec. 16, 2015; accepted Mar. 31, 2016

treatments were set up, 10 of which were moderate soil water stress (relative soil water content maintained at 60%–65% field capacity) and severe soil water stress (relative soil water content maintained at 50%–55% field capacity), respectively, at germination, vine growth period, florescence period, berry enlargement and coloring maturity periods with other growth stage under normal water condition (relative soil water content maintained at 70%–75% field capacity). Meanwhile, a full irrigation (relative soil water content maintained at 80%–85% field capacity) during berry enlargement period was also carried out and the normal water supply (relative soil water content maintained at 70%–75% field capacity) during the whole growth period was as the control. The results showed that the variation trend in soil water content within the 0–100 cm soil layer were similar in different treatments, i.e., the soil water increased with increasing soil depth. The effects of drought stress controlled with regulated deficit irrigation was weakened with increased soil depth, and the soil layer of 40–60 cm was with largest soil water reduction compared with CK. Soil water content along profile was lowest at berry enlargement period for all the treatments. The timely change trend of water consumption rate of wine rape was similar for different treatments. The minimum and maximum daily water consumption rates of wine grape occurred respectively during germination period (0.13–0.33 $mm \cdot d^{-1}$) and berry enlargement period (2.30–4.09 $mm \cdot d^{-1}$). Maximum yield and water use efficiency appeared under moderate water stress at grape germination period, which were 15 228 $kg \cdot hm^{-2}$ and 3.62 $kg \cdot m^{-3}$, respectively. This was followed by grape enlargement period full irrigation treatment (7 128 $kg \cdot hm^{-2}$ and 2.26 $kg \cdot m^{-3}$), while minimum rate was under severe soil water stress at grape enlargement period. Anthocyanins, total reducing sugar, tannin and total phenol contents in wine grape under severe soil water stress at coloring maturity stage were respectively 2.7% and 6.56%, 17.91% and 23.23% higher than that of under the full irrigation treatment, and titratable acid content effectively was restrained ($P < 0.05$). There was no significant difference ($P > 0.05$) in wine grape quality between the control and other treatments. In terms of integrated yield, water productivity efficiency and fruit quality, the optimum irrigation pattern of wine grape was moderate soil water stress at coloring maturity (relative soil water content maintained at 60%–65% field capacity) in combination with normal water supply (relative soil water content maintained at 70%–75% field capacity) during the other growth periods. Therefore, reasonable regulated deficit irrigation significantly improved water productivity efficiency of wine grape. This was not only water-saving, but high in water use efficiency and beneficial for grape quality improvement which was important for vine grape cultivation in Hexi Corridor.
Keywords Regulated deficit irrigation; Drought stress; Water consumption characteristics; Yield; Water productivity efficiency; Quality; Wine grape

甘肃河西走廊处于世界葡萄酒原料的最适宜产区(北纬 36°~40°)，具有降水少、空气干燥、相对温度低、成熟前降温快、病虫危害程度小等栽培优质酿酒葡萄(*Vitis vinifera*)得天独厚的地理资源优势。然而，当地不合理灌溉导致其产量低而不稳，品质低下，极大制约了酿酒葡萄产业可持续发展和农民增收。因此，在保证较高产量的前提下，如何基于水分品质响应关系对其进行科学、合理的灌溉和土壤水分调控以达到节水、优质、高效的目的是河西走廊酿酒葡萄栽培及葡萄酒生产中迫切需要解决的科学问题。解决河西走廊水资源短缺的首选技术是实行节水灌溉。合理灌溉可以协调土壤中的水、肥、气、热，有利于酿酒葡萄的生长发育及品质的提高。目前在滴灌调亏技术方面已有大量研究报道，如唐晓伟等[1]、崔宁博等[2]、刘炼红等[3]、闫曼曼等[4]分别进行了滴灌调亏对番茄(*Lycopersicon esculentum*)、梨枣(*Ziziphus jujuba*)、西瓜(*Citrullus lanatus*)、海岛棉(*Gossypium barbadense*)等作物灌溉研究，证明了滴灌调亏具有较好的节水、增产效果，并能有效改善作物品质。葡萄栽培方面，国内学者先后从不同角度开展了滴灌调亏对葡萄产量的影响研究[5−7]。刘洪光等[5]通过研究不同生育期调亏灌溉对产量的影响，表明在葡萄萌芽期控制灌水下限为田间持水率的40%时，产量最大。李昭楠等[6]通过研究不同梯度的灌水定额对产量影响，发现当灌水定额为 240 mm 时产量最大；徐斌等[7]、孔维萍等[8]从不同方面开展了滴灌调亏对葡萄产量和品质的影响研究，先后得出在着色成熟期适度亏水可有效降低葡萄可滴定酸含量，并提高可溶性固形物和花青素含量，从而提高葡萄综合品质。然而，上述研究仅针对葡萄不同生育期进行了亏水试验，而忽略了不同亏水梯度对产量和品质的影响。目前关于不同生育期、不同梯度滴灌调亏对酿酒葡萄耗水规律、产量、品质的综合研究并不多见。本试验以河西走廊 6 a 生酿酒葡萄为研究对象，探讨不同生育期、不同梯度的调亏灌溉对酿酒葡萄产量、水分利用效率及各类品质指标的影响规律研究，确定出各生育期对土壤水分的需求规律，从而为在保证稳产的前提下如何提高分水利用效率提供理论依据，实现酿酒葡萄节水、调质和增效的目的。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2014年3—10月在河西走廊东中部武威市凉州区清源镇威龙葡萄园产区进行。该地区位于

甘肃省石羊河流域中的黄羊河、杂木河和清源三大灌区相交汇的区域，地势平坦，属典型的大陆性干旱气候区，海拔2 104.6 m，阳光充足、干燥少雨、昼夜温差大，具有丰富的"冷资源"。年均气温7.7 ℃，多年平均降雨量为160 mm左右，年蒸发量2 020 mm，年日照时数达3 000 h以上。试验田土质为沙质壤土，pH 7.9，容重为1.6 $g\cdot cm^{-3}$，田间最大持水量为23.1%，耕层内(0~20 cm)含有机质14.28 $g\cdot kg^{-1}$，碱解氮59.2 $mg\cdot kg^{-1}$，速效磷17.1 $mg\cdot kg^{-1}$，速效钾197.4 $mg\cdot kg^{-1}$。地下水位埋深较深，为25~30 m。

1.2 试验设计

供试葡萄品种为'梅鹿辄'(Merlot)，于2009年定植，南北行向，行距 2.5 m，株距 1.0 m，小区面积15.0 m×1.5 m。试验采用单因素完全随机试验，共 12 个水分调控处理，每个处理设 3 次重复，共 36 个小区。在酿酒葡萄萌芽期、抽蔓期、开花期、浆果膨大期和着色成熟期设 3 种水分梯度,正常供水、中度亏水和重度亏水，各处理土壤水下限为田间持水量的 70%~75%、60%~65%和 50%~55%，土壤水上限值依次为田间持水量的 100%、90%和 80%，为细化酿酒葡萄生育后期水分对果实生长发育的影响，在浆果膨大期增设 1 个水分梯度(土壤水下限为田间持水量的 80%~85%)，具体试验设计见表 1 所示。

灌水方式采用固定一侧滴灌灌水方式，灌水时间根据时域反射仪(TDR)监测土壤含水量值确定，灌水次数不限。当小区实测土壤相对含水率达到试验设计对应的下限值(表 1)时灌水，各处理灌水量为土壤含水率从灌水下限到灌水上限所需水量。

计算公式为：m=10 000$fH(\theta_{上}-\theta_{下})$，式中：$m$为计算所得灌水量，为 270 $m^3\cdot hm^{-2}$；f为土壤湿润比，取值 47.5%；H为土壤计划湿润层，取值 1.0 m；$\theta_{上}$、$\theta_{下}$分别为土壤含水率上限和下限，均以体积比的田间持水率百分比计。

滴灌管采用分支控制法，即在每个小区都安装 1 个控制阀，随时控制该小区的灌水量，压力表和水表位于滴灌枢纽处，系统工作压力为 0.1 MPa，滴灌管沿葡萄行铺设，在每株葡萄的东侧铺设滴灌管。

表 1 不同生育期调亏灌溉处理的土壤含水量(占田间持水率的百分数)

Table 1 Soil moisture contents in different regulated deficit irrigation treatments (percentage of field capacity) %

处理 Treatment	萌芽期 Germination period	抽蔓期 Vining period	开花期 Blossom period	浆果膨大期 Berry enlargement period	着色成熟期 Coloring maturity period
MG	60~65	70~75	70~75	70~75	70~75
MP	70~75	60~65	70~75	70~75	70~75
MF	70~75	70~75	60~65	70~75	70~75
ME	70~75	70~75	70~75	60~65	70~75
MC	70~75	70~75	70~75	70~75	60~65
SG	50~55	70~75	70~75	70~75	70~75
SP	70~75	50~55	70~75	70~75	70~75
SF	70~75	70~75	50~55	70~75	70~75
SE	70~75	70~75	70~75	50~55	70~75
SC	70~75	70~75	70~75	70~75	50~55
AE	70~75	70~75	70~75	80~85	70~75
CK	70~75	70~75	70~75	70~75	70~75

MG：萌芽期中度亏水；MP：抽蔓期中度亏水；MF：开花期中度亏水；ME：浆果膨大期中度亏水；MC：着色成熟期中度亏水；SG：萌芽期重度亏水；SP：抽蔓期重度亏水；SF：开花期重度亏水；SE：浆果膨大期重度亏水；SC：着色成熟期重度亏水；AE：浆果膨大期充分供水；CK：各生育期正常供水。下同。MG: moderate water deficit at germination period; MP: moderate water deficit at vining period; MF: moderate water deficit at florescence period; ME: moderate water deficit at berry enlargement period; MC: moderate water deficit at coloring maturity period; SG: severe water deficit at germination period; SP: severe water deficit at vining period; SF: severe water deficit at florescence period; SE: severe water deficit at berry enlargement period; SC: severe water deficit at coloring maturity period; AE: abundance water at enlargement period; CK: control, conventional irrigation. The same below.

1.3 观测指标和测试方法

1.3.1 土壤含水量的测定

采用传统烘干称重法测定土壤含水量。取样深度为 100 cm，每 20 cm 一层进行采样测定。在酿酒葡萄萌芽期、抽蔓期、开花期、浆果膨大期和着色成熟期开始与结束时各测定一次，且在各次灌水前后以及降雨后加测。每个试验小区采用 5 点法取样，每个处理 3 次重复。

1.3.2 耗水量的测定

采用水量平衡法计算，计算公式为：

$$ET_{I-II} = 10\sum_{i=1}^{n} r_i H_i (W_{i_I} - W_{i_{II}}) + M + P + K - D \quad (1)$$

式中：ET_{I-II}为酿酒葡萄阶段耗水量，mm；i为土层序号；n为土层总数；r_i为第i层土壤干容重，$g\cdot cm^{-3}$；H_i为第i层土壤厚度，cm；W_{i_I}、$W_{i_{II}}$分别为第i层土壤在该生育期阶段始末的质量含水量，%；M和P分别为该生育期阶段内灌水量和降雨量，mm；K为该生育期阶段内地下水补给量，mm，试验区地下水埋深大于10 m，故K=0；D为阶段内排水量，mm，试验区为干旱区，故D=0。

1.3.3　蒸发量的测定

用微型蒸渗桶测定。将微型蒸渗桶随机埋于每个小区自然土中，在酿酒葡萄整个生育期内每天下午8:00用精度为0.1 g的电子秤称量蒸渗桶，且在每次灌水前和灌水后加测，蒸渗桶重量的变化即为每天的蒸发量。

1.3.4　产量的测定

在酿酒葡萄成熟采收期，各处理采摘该小区内所有果穗，用精度为0.01 g的电子秤进行称量，各处理3个重复的平均值即为该处理的实际产量，并换算为标准产量($kg\cdot hm^{-2}$)。

1.3.5　葡萄品质测定

待酿酒葡萄成熟测产后，每个小区随机取样10株果穗，用保温箱带回实验室进行品质测定。用pH差示法[9]测定花青苷含量。用斐林试剂热滴定法[10]测定还原糖含量。可滴定酸用NaOH滴定法[11]测定，并以酒石酸计。采用福林–丹宁斯(Folin-Denis)法[10]测定单宁含量。葡萄果皮中总酚的测定采用福林–肖卡法[12]。

1.4　数据分析统计

数据采用SPSS 17.0软件中的LSD多重比较法比较数据差异的显著性并用Origin 8.0做图，各图表中出现的数据均为平均值。

2　结果与分析

2.1　不同调亏灌溉条件下葡萄生育期内不同耕层土壤水分动态变化

不同处理土壤含水量随土壤深度变化趋势相一致，呈持续递增趋势(图1A~E)。在萌芽期，处理MG和SG土壤含水量均低于其他处理，且处理SG土壤含水量低于处理MG。在抽蔓期，处理MP和SP土壤含水量均低于其他处理，且处理SP土壤含水量低于处理MP。处理MG由于萌芽期调亏后，在抽蔓期0~80 cm土壤剖面含水量仍低于处理MF、ME、MC、AE和CK，且在20~40 cm土壤剖面处与处理MP无显著性差异。处理SG表现和处理MG相似，但是由于重度亏水，灌溉后不能及时恢复，因此在0~60 cm土壤与处理SP均无显著性差异。可以看出，随着土壤剖面的递增，调亏灌溉对土壤含水量的影响越来越弱。在开花期，处理MF和SF土壤含水量均低于其他处理，且处理SF土壤含水量低于处理MF。该时期内，由于酿酒葡萄开始快速生长，对土壤水分消耗较大，且由于处理MG萌芽期调亏和MP抽蔓期调亏后，在0~40 cm土壤剖面含水量与处理MF无显著性差异；处理SG、SP表现和处理MG、MP相似，但是由于重度亏水，灌溉后恢复缓慢，因此在0~100 cm土壤剖面内与处理SP均无显著性差异。可以看出，在40~60 cm土壤剖面，调亏处理含水量较对照减少幅度最大，这可能与水分补给不足，葡萄根系过度消耗该段剖面水分有关。在浆果膨大期，处理AE土壤含水量最高，处理ME和SE土壤含水量低于其他处理，且处理SE土壤含水量低于处理ME。该时期内，酿酒葡萄快速生长，叶片面积增大，阻挡了阳光对地表的直射，此时水分消耗主要以作物耗水为主且耗水量较大，因此所有处理在整个土壤剖面内含水量均低于其他生育期。在着色成熟期，处理MC和SC土壤含水量低于其他处理，且处理SC土壤含水量低于处理MC。由于生育前中期的作物耗水使得该生育期内的土壤含水量普遍较低，尽管此时调亏灌溉对整个土壤剖面有影响，但是只是对0~60 cm土壤剖面有显著影响，而对60~80 cm土壤剖面影响不显著。

2.2　不同调亏灌溉对酿酒葡萄日耗水强度变化的影响

日耗水强度反映了酿酒葡萄不同生育期内施肥、地温、灌溉等对酿酒葡萄生长发育的综合影响。从图2可以看出，萌芽期耗水强度所有生育期内的最低水平仅为0.13~0.33 $mm\cdot d^{-1}$，这是因为该生育期酿酒葡萄刚出土不久，气温最低，光合作用、蒸腾作用最弱；抽蔓期耗水强度明显高于萌芽期，为1.34~2.29 $mm\cdot d^{-1}$，以处理MP、SP耗水强度水平较低，说明亏水处理会降低酿酒葡萄日耗水强度；开花期耗水强度略高于抽蔓期，为1.59~2.36 $mm\cdot d^{-1}$，因为此生育期气温高于抽蔓期，酿酒葡萄进入生殖生长，营养生长和生殖生长并存；浆果膨大期耗水量最高，历时最长，耗水强度最大，为2.30~4.09 $mm\cdot d^{-1}$，该生育期中，酿酒葡萄生殖生长达到顶峰，气温也处全生育期最高；至着色成熟期，耗水强度逐减降为2.00~3.72 $mm\cdot d^{-1}$，该生育期内气温有所降低，营养生长基本停止。从总体来看，各处理随着灌水量的增加，日耗水强度也随之增加，其中以AE处理耗水强度较大。

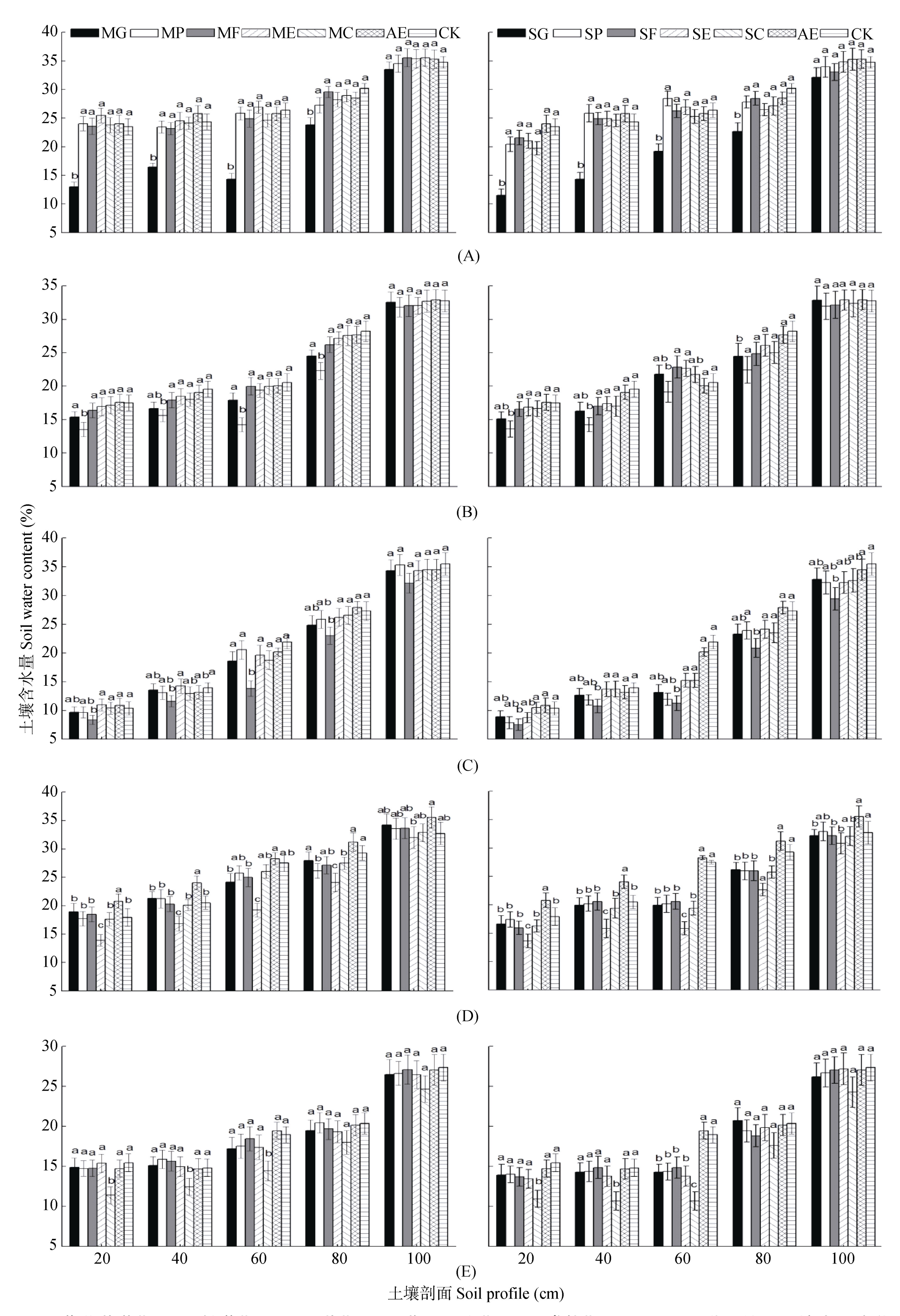


图 1 葡萄萌芽期(A)、抽蔓期(B)、开花期(C)、浆果膨大期(D)和成熟期(E)不同调亏灌溉处理土壤水分变化

Fig. 1 Dynamic changes of soil water content under different regulated deficit irrigation treatments at germination period (A), pumping vine period (B), blossom period (C), berry enlargement period (D) and coloring maturity period (E) of wine grape

不同小写字母表示不同处理间达到 0.05 水平显著差异。下同。Data with different lowercases are significantly different at 0.05 level. The same below.

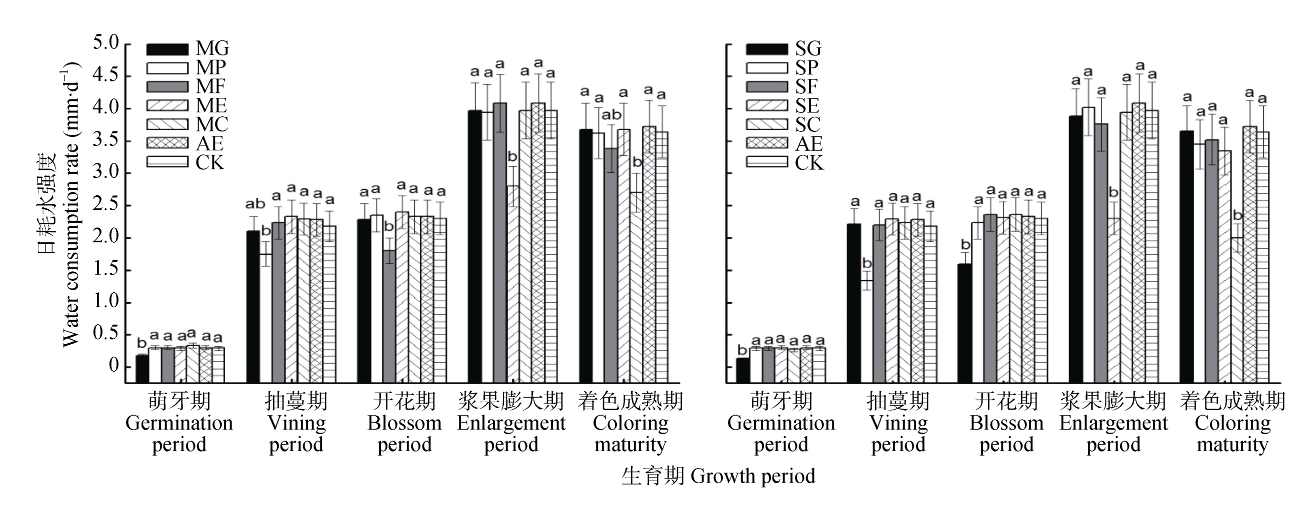


图 2　不同调亏灌溉处理下酿酒葡萄各生育期耗水强度动态变化

Fig. 2　Dynamic change of water consumption intensity of wine grape in each growth period under different regulated deficit irrigation treatments

2.3　不同调亏灌溉对酿酒葡萄品质的影响

为认识不同梯度土壤含水对酿酒葡萄品质的影响，本研究分析了不同生育期调亏灌溉条件下葡萄的花青苷、可滴定酸、还原糖、单宁和酚类物质等的水平。

2.3.1　对花青苷的影响

花青苷在酿酒葡萄中主要起调节葡萄色泽效果，其含量的高低直接影响酿酒葡萄的外观品质。由表 2 可以看出，处理 SC 和 AE 的花青苷分别为 631.80 mg·kg^{-1} 和 605.80 mg·kg^{-1}，高于处理 CK 5.4%和 1.1%，而处理 SE 的花青苷最低，仅为 423.55 mg·kg^{-1}，较 CK 低 29.3%，且与 CK 差异显著。其他亏水处理的花青苷含量均低于 CK。这表明在着色成熟期进行控水可以促进花青苷积累，而浆果膨大期控水不利于花青苷积累。在萌芽期、抽蔓期和开花期进行控水对酿酒葡萄花青苷积累影响不显著。

2.3.2　对可滴定酸的影响

从表 2 可以看出，处理 SE 可滴定酸含量最高，为 9.59 g·L^{-1}，ME 次之，分别较 CK 增加 12.4%和 16.7%，且与 CK 差异显著，表明在浆果膨大期亏水不利于酿酒葡萄后期的自然降酸；处理 MC 和 SC 可滴定酸含量较 CK 有所下降，分别降低 9.8%和 6.3%，表明在着色成熟期亏水可以降低可滴定酸含量，但重度亏水并不能更大幅度降低其含量。

2.3.3　对还原糖的影响

还原糖是酿酒葡萄总物质含量中最重要的理化品质因子，葡萄糖和果糖占还原糖的90%以上。糖类物质不仅对酿酒葡萄的生长具有一定生理作用，而且对酿酒葡萄成熟后的品质也有很大影响。从表2可看出，处理MC的还原糖含量最高，达到 279.10 g·L^{-1}，较CK增加6.6%，而处理SC的还原糖含量较CK增加2.3%。尽管处理MC和SC与CK之间无显著差异，但是仍然有一定的增幅，说明在着色成熟期亏水能够提高酿酒葡萄还原糖含量。处理ME和SE还原糖含量较低，分别为231.03 g·L^{-1}和216.67 g·L^{-1}，比CK分别低11.8%和17.2%，且与CK差异显著，说明在浆果膨大期亏水不利于酿酒葡萄还原糖的积累，不利于酿酒葡萄品质的提升。

2.3.4　对单宁的影响

酿酒葡萄中单宁主要来源于葡萄梗、葡萄皮和葡萄籽，与葡萄的涩味、抗氧化性能有关，有沉淀蛋白质、稳定色素、提高结构感、抗自由基和抗菌的作用[13]。由表 2 可看出，处理 SC 的单宁含量最高，达 3.26 g·kg^{-1}，较 CK 高 21.6%；处理 MC 次之，为 3.16 g·kg^{-1}，较 CK 高 17.9%。处理 SC 和 MC 与 CK 差异显著，说明在着色成熟期重度亏水可大幅提高酿酒葡萄果实单宁含量。尽管处理 MG、MP、MF、SG、SP 和 SF 的单宁含量较 CK 也有所增高，但与 CK 相比无显著差异，说明在萌芽期、抽蔓期和开花期进行亏水对单宁含量的增高有一定的促进作用。而处理 ME 和 SE 的单宁含量较低，分别较 CK 低 7.1%和 11.2%，且与 CK 差异显著，说明在浆果膨大期亏水不利于酿酒葡萄单宁含量的积累。

2.3.5　对总酚的影响

由表2可知，处理SC总酚含量最高，达4.49 g·kg^{-1}，较 CK 增高 51.2%，与 CK 差异显著，而处理 MC 为 3.66 g·kg^{-1}，较 CK 仅增高 23.2%，说明在着色成熟期亏水能大幅度提高酿酒葡萄果实总酚含量，且在该生育期水分亏缺程度越重，总酚含量增幅越大。处理 MC、MG、MP、MF、SG、SP 和 SF 的总酚含

表 2 不同调亏灌溉条件下酿酒葡萄的品质性状
Table 2 Quality characteristics of wine grape under different regulated deficit irrigation treatments

处理 Treatment	花青苷 Anthocyanin (mg·kg^{-1})	可滴定酸 Titratable acid (g·L^{-1})	还原糖 Total reducing sugar (g·L^{-1})	单宁 Tannin (g·kg^{-1})	总酚 Total phenols (g·kg^{-1})
MG	535.84±53.58abA	8.20±0.80abcA	250.13±21.76abA	2.89±0.25abcAB	3.23±0.25bcAB
MP	543.13±53.23abA	8.10±0.89abcA	243.81±25.60abA	2.76±0.27abcAB	3.18±0.29bc B
MF	530.03±51.94abA	8.43±0.65abcA	248.77±22.89abA	2.85±0.25abcAB	3.25±0.29bcAB
ME	466.87±51.36bcA	9.24±0.84abA	231.03±22.64abA	2.49±0.26cB	2.69±0.30bcB
MC	615.57±47.4aA	7.41±0.66cA	279.10±30.70aA	3.16±0.29abA	3.66±0.32abAB
SG	527.05±47.96abA	8.63±0.97abcA	248.67±19.15abA	2.86±0.32abcAB	3.81±0.40abA
SP	533.97±47.52abA	8.44±1.01abcA	239.67±21.81abA	2.72±0.33abcAB	3.93±0.36abA
SF	542.56±60.77abA	8.21±0.72abcA	234.10±20.83abA	2.84±0.28abcAB	3.91±0.38abA
SE	423.55±50.83cAB	9.59±0.95aA	216.67±24.27bA	2.38±0.26cB	2.42±0.27cB
SC	631.80±55.60aA	7.70±0.67bcA	267.89±32.15aA	3.26±0.25aA	4.49±0.54aA
AE	605.80±59.97aA	8.12±0.85abcA	255.00±22.44abA	2.64±0.24bcAB	2.94±0.26bcB
CK	599.25±52.13aA	8.22±0.76abcA	261.92±25.93abA	2.68±0.24bcAB	2.97±0.29bcB

不同小写字母表示不同处理间达到 0.05 水平显著差异,不同大写字母表示不同处理间达到 0.01 水平显著差异。下同。Data with different lowercase letters and capital letters are significantly different at 0.05 and 0.01 levels, respectively. The same below.

量较CK也有所增高，但与CK无显著差异，说明在萌芽期、抽蔓期和开花期进行调亏对酿酒葡萄果实总酚含量的提高有一定的促进作用；处理 SE 的总酚含量最低，仅为 2.42 g·kg^{-1}，处理 ME 次之，为 2.69 g·kg^{-1}，分别较 CK 降低 18.5%和 9.4%，但相比 CK 无显著差异，说明在浆果膨大期亏水不利于果实总酚含量的积累。

2.4 不同调亏灌溉对酿酒葡萄产量和水分利用效率的影响

2.4.1 对产量性状的影响

由表 3 可看出，处理 MG、MP、MF、MC、SG、SC和AE的单穗重较高，与CK无显著差异，说明在萌芽期、抽蔓期、开花期和着色成熟期的中度亏水以及在萌芽期、着色成熟期重度亏水对单穗重影响不显著；而处理 ME 与 SE 的单穗重较低，较 CK 分别降低22.5%和32.9%，说明在浆果膨大期亏水均会大幅度降低单穗重，这对酿酒葡萄的后期增产产生不利影响。处理 MG 的穗数最多，较 CK 增加 5.1%，说明在萌芽期中度亏水能够提高酿酒葡萄挂果率；处理 MP、MF、MC、SG、SP 和 SF 的穗数较 CK 略少，而处理 ME、SE 和 SC 的穗数较 CK 分别减少 22.9%、26%和 25%，说明在抽蔓期、开花期以及着色成熟期适度的水分亏缺对挂果率影响不显著，而在浆果膨大期进行水分亏缺可显著降低挂果率。从酿酒葡萄单株产量统计中发现，萌芽期、抽蔓期和着色成熟期，进行适度的水分亏缺不会造成减产，而在浆果膨大期的重度亏水则会造成严重减产，处理 SE 的单株产量较 CK 降低了 52.7%，与 CK 差异显著。

2.4.2 对产量和水分利用效率的影响

由表 3 可看出，在所有处理中，以萌芽期中度亏水处理MG的产量最高，为15 228 kg·hm^{-2}，比CK增高 1.1%，说明萌芽期中度亏水不会造成减产，还有一定的节水增产效益；尽管处理 MP、MC 和 AE 的产量较 CK 有一定幅度的降低，但各处理之间无显著差异，说明在抽蔓期和着色成熟期中度亏水以及浆果膨大期丰水处理对产量无显著影响；处理 MF、SG、SP、SF 和 SC 的产量较 CK 均有所下降，分别降低了 20.7%、22.6%、33.3%、35.7%和 32.5%，但与 CK 无显著差异，说明在开花期中度亏水以及萌芽期、抽蔓期、开花期与着色成熟期重度亏水会造成一定幅度的减产；处理 ME 与 SE 的产量较低，仅为 8 586 kg·hm^{-2} 和 7 128 kg·hm^{-2}，较 CK 分别降低了 43.1%和 52.7%，且差异显著，说明在浆果膨大期的中度和重度亏水会造成严重减产。

同时可以看出，处理 MG 的水分利用效率最高，较 CK 提高 1.7%，说明在萌芽期的适度亏水可提高水分利用效率。处理 MP、MF、MC、SG、SP、SC 和 AE 的水分利用效率较 CK 略低，但与 CK 无显著差异，说明在抽蔓期、开花期与着色成熟期的重度亏水和萌芽期、抽蔓期与着色成熟期的重度亏水对水分利用效率影响不显著。而处理 ME、SF 和 SE 的水分利用效率低于 CK，分别降低了 32.3%、33.1%和 36.5%，且与 CK 差异显著，说明在浆果膨大期亏水与开花期重度亏水不但降低了水分利用效率，而且造成减产，因此在浆果膨大期进行水分调亏不利于产量和水分利用效率的提高。

表 3　不同调亏灌溉对酿酒葡萄产量和水分利用效率的影响
Table 3　Effects of different regulated deficit irrigation treatments on yield and water use efficiency of wine grape

处理 Treatment	穗重 Spike weight (g)	单株穗数 Spike number	单株产量 Yield per tree (kg)	产量 Yield (kg·hm^{-2})	耗水量 Water consumption (m^3·hm^{-2})	水分利用效率 WUE (kg·m^{-3})
MG	182.24±17.86aA	20.6±2.02aA	3.76±0.45aA	15 228.0±1 355.29aA	4 205.9	3.62±0.35aA
MP	178.36±15.52aA	18.4±2.03abA	3.29±0.33aA	13 324.5±1 399.07aA	4 118.6	3.24±0.36abA
MF	165.26±17.85aA	17.9±1.37abA	2.95±0.29aAB	11 947.5±1 027.49abA	4 193.5	2.85±0.22abA
ME	140.21±14.30bA	15.1±1.33bA	2.12±0.23bcB	8 586.0±661.12bA	3 569.9	2.41±0.21bA
MC	180.81±14.28aA	18.7±1.85abA	3.38±0.26aA	13 689.0±1 245.70aA	3 984.6	3.44±0.34abA
SG	160.42±17.97aA	18.0±1.38abA	2.88±0.25aAB	11 664.0±968.11abA	4 105.3	2.84±0.22abA
SP	151.23±13.76abA	16.4±1.49abA	2.48±0.22bAB	10 044.0±1 205.28abA	4 013.9	2.50±0.23abA
SF	147.77±13.15abA	16.2±1.44abA	2.39±0.25bAB	9 679.5±967.95abA	4 075.3	2.38±0.21bA
SE	121.31±12.74bA	14.5±1.62bA	1.76±0.15cB	7 128.0±698.54bA	3 153.5	2.26±0.25bA
SC	170.21±14.64aA	14.7±1.77bA	2.51±0.19bAB	10 165.5±1 118.21abA	3 739.6	2.72±0.33abA
AE	180.75±19.34aA	19.6±1.96abA	3.55±0.32aA	14 377.5±1 107.07aA	4 355.9	3.30±0.33abA
CK	190.25±16.65aA	19.6±1.96aA	3.72±0.31aA	15 066.0±1 325.81aA	4 234.6	3.56±0.32aA

3　讨论

调亏灌溉通过在作物生长发育的某些阶段主动施加适度水分胁迫，减少土壤水分无效蒸发、降低蒸腾速率，调节作物的生长进程，从而达到全面提高作物水分生产力的目的[14–15]。因此，可在作物需水较少的生育期灌溉较少的水量，而节约的水量可供需水旺盛期利用。通过对酿酒葡萄耗水强度研究，发现耗水强度是一个动态变化的过程，其大小依次为：浆果膨大期(2.30~4.09 mm·d^{-1})>着色成熟期(2.00~3.72 mm·d^{-1})>开花期(1.59~2.36 mm·d^{-1})>抽蔓期(1.34~2.29 mm·d^{-1})>萌芽期(0.13~0.33 mm·d^{-1})。可以看出，酿酒葡萄在萌芽期耗水强度最小，浆果膨大期耗水强度最大，这与不同生育期作物生理活动、植株蒸腾、棵间土壤蒸发等因素相关，这与张芮等[16]研究结果相一致。因此在酿酒葡萄需水较少的生育期(萌芽期和抽蔓期)适度的亏水，而在耗水高峰期(浆果膨大期)，给予充足的水量，这不仅可以有效节水，而且利于酿酒葡萄的生殖生长和产量建成。

酿酒葡萄的品质决定了葡萄酒的品质，而影响酿酒葡萄品质的外界因素很多，包括气象条件[17]、栽培技术[18]、土壤性状[19]、水分含量[20]等。其中，如何进行合理有效的灌溉对酿酒葡萄品质的影响尤为显著[21]。本试验结果表明在浆果膨大期进行中度、重度的调亏灌溉，会抑制酿酒葡萄还原糖的积累，减少单宁、总酚的含量，不利于后期的自然降酸；而在着色成熟期中度亏水(MC)可以使酿酒葡萄花青苷、还原糖含量提高 2.7%、6.6%，可滴定酸含量降低 9.9%，同时使单宁、总酚含量分别提高 17.9%、23.2%，酿酒葡萄品质总体最优。萌芽期、抽蔓期、开花期的调亏灌溉处理对酿酒葡萄品质的影响不显著。这一研究结果说明对酿酒葡萄适量、适时的调亏灌溉可以达到节水调质的目的。在其他生育期正常灌水条件下，着色成熟期土壤含水量达到田间持水量的 60%~65%时进行灌水可以显著改善酿酒葡萄的品质，这为酿酒葡萄栽培技术进行调亏灌溉制度的选择提供了科学依据。

调亏灌溉对酿酒葡萄产量及水分利用效率有一定影响。大量研究认为，适度的调亏灌溉能够提高葡萄产量与水分利用效率。刘洪光等[22]研究表明，在萌芽期土壤田间持水率达 40%时，进行灌溉处理可使葡萄产量增加 4.71%。张芮等[23]研究表明，在萌芽期土壤田间持水率达 55%~60%时，进行适度的灌溉处理可使葡萄产量增加 2.87%，水分利用效率提高 21.21%。本试验结果也表明，萌芽期中度亏水处理 MG 的产量和水分利用效率最高，比 CK 提高 1.1%和 1.7%，说明萌芽期中度亏水有一定的节水效益。而处理 ME、SE 的产量和水分利用效率均较低，分别较 CK 降低 43.1%、52.7%和 32.3%、36.5%，且差异显著，说明在浆果膨大期的中度和重度亏水会造成严重减产。尽管其他生育期适度亏水对酿酒葡萄产量和水分利用效率也会造成一定幅度的下降，但是与 CK 之间无显著差异。可以看出，萌芽期适度亏水(土壤含水率下限为 60%~65%田间持水率)、其余生育期正常供水是酿酒葡萄产量和水分利用效率最高的调亏模式。

4 结论

综合考虑产量、水分生产效率及果实品质等指标，最佳酿酒葡萄水分调控处理为着色成熟期中度胁迫，即着色成熟期土壤相对含水率为 60%~65%、其余生育期土壤相对含水率为 70%~75%。由此可见，在酿酒葡萄栽培时适时、适度的调亏灌溉既能显著提高水分生产效率，实现节水、高效用水的目的，又能提高果实品质，对河西走廊地区酿酒葡萄种植具有重要的意义。然而，本试验只对单个生育期进行了调亏灌溉分析研究，而连续或交替调亏对酿酒葡萄产量和品质的影响是否更具有优势还有待进一步研究。

参考文献 References

[1] 唐晓伟，刘明池，郝静，等. 调亏灌溉对番茄品质与风味组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(4): 970–977
Tang X W, Liu M C, Hao J, et al. Influences of regulated deficit irrigation on sensory quality and flavor components of tomato[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(4): 970–977

[2] 崔宁博，杜太生，李忠亭，等. 不同生育期调亏灌溉对温室梨枣品质的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 32–38
Cui N B, Du T S, Li Z T, et al. Effects of regulated deficit irrigation at different growth stages on greenhouse pear-jujube quality[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7): 32–38

[3] 刘炼红，莫言玲，杨小振，等. 调亏灌溉合理滴灌频率提高大棚西瓜产量及品质[J]. 农业工程学报，2014，30(24): 95–104
Liu L H, Mo Y L, Yang X Z, et al. Reasonable drip irrigation frequency improving watermelon yield and quality under regulated deficit irrigation in plastic greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(24): 95–104

[4] 闫曼曼，郑剑超，张巨松，等. 调亏灌溉对海岛棉生物量和氮素累积分配及产量的影响[J]. 中国生态农业学报，2015，23(7): 841–850
Yan M M, Zheng J C, Zhang J S, et al. Effects of regulated deficit irrigation on accumulation and distribution of biomass and nitrogen, and yield of island cotton[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(7): 841–850

[5] 刘洪光，何新林，王雅琴，等. 调亏灌溉对滴灌葡萄生长与产量的影响[J]. 石河子大学学报:自然科学版，2010，28(5): 610–613
Liu H G, He X L, Wang Y Q, et al. Effects of regulated deficit irrigation on growing and yield of drip irrigated drip irrigated[J]. Journal of Shihezi University: Natural Science, 2010, 28(5): 610–613

[6] 李昭楠，李唯，刘继亮，等. 不同滴灌水量对干旱荒漠区酿酒葡萄光合及产量的影响[J]. 中国生态农业学报，2011，19(6): 1324–1329
Li Z N, Li W, Liu J L, et al. Effect of drip irrigation pattern on wine grape growth, yield, photosynthesis and water use efficiency in arid desert regions[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(6): 1324–1329

[7] 徐斌，张芮，成自勇，等. 不同生育期调亏灌溉对设施延后栽培葡萄生长发育及品质的影响[J]. 灌溉排水学报，2015，34(6): 86–89
Xu B, Zhang R, Cheng Z Y, et al. Effects of deficit irrigation on growth and quality of greenhouse grape under delayed cultivation indifferent stages[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(6): 86–89

[8] 孔维萍，成自勇，张芮，等. 不同时期亏水对设施延后栽培葡萄生长特性与品质的影响[J]. 广东农业科学，2014，41(17): 33–37
Kong W P, Cheng Z Y, Zhang R, et al. Effect of water deficit on growth characteristics and quality of delayed cultivation grape during different stages[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2014, 41(17): 33–37

[9] 冯晨静，关军锋，杨建民，等. 草莓果实成熟期花青苷、酚类物质和类黄酮含量的变化[J]. 果树学报，2003，20(3): 199–201
Feng C J, Guan J F, Yang J M, et al. Changes of the content of anthocyanin, phenolic and flavonoid compounds in strawberries during the maturation[J]. Journal of Fruit Science, 2003, 20(3): 199–201

[10] 王华. 葡萄与葡萄酒实验技术操作规范[M]. 西安：西安地图出版社, 1999
Wang H. Grape and Wine Experimental Techniques Practice[M]. Xi'an: Xi'an Map Publishing House, 1999

[11] 白宝璋，任永信，白嵩. 植物生理生化[M]. 北京：中国农业科技出版社, 2003
Bai B Z, Ren Y X, Bai S. Plant Physiology and Biochemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2003

[12] Jayaprakasha G K, Singh R P, Sakariah K K. Antioxidant activity of grape seed (*Vitis vinifera*) extracts on peroxidation models in vitro[J]. Food Chemistry, 2001, 73(3): 285–290

[13] 李华. 葡萄酒中的丹宁[J]. 西北农林科技大学学报：自然科学版, 2002, 30(3): 137–141
Li H. Tannins in wines[J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry: Natural Science Edition, 2002, 30(3): 137–141

[14] Li F M, Liu X L, Li S Q. Effects of early soil water distribution on the dry matter partition between roots and shoots of winter wheat[J]. Agricultural Water Management, 2001, 49(3): 163–171

[15] 纪学伟，成自勇，张芮，等. 干旱荒漠绿洲区酿酒葡萄滴灌控水灌溉试验研究[J]. 干旱地区农业研究，2015，33(2): 135–140
Ji X W, Cheng Z Y, Zhang R, et al. Experimental research on drip irrigation by water controlling for wine grape in arid desert oasis[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(2): 135–140

[16] 张芮，成自勇，杨阿利，等. 小管出流不同亏水时期对延后栽培葡萄耗水及品质的影响[J]. 干旱地区农业研究，2013，31(2): 164–168

Zhang R, Cheng Z Y, Yang A L, et al. Research on water consumption and quality of greenhouse delayed cultivation grape under small tube flow deficit irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(2): 164–168

[17] 张晓煜, 亢艳莉, 袁海燕, 等. 酿酒葡萄品质评价及其对气象条件的响应[J]. 生态学报, 2007, 27(2): 740–745
Zhang X Y, Kang Y L, Yuan H Y, et al. The quality evaluation ofwine grape and its respond to weather condition[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(2): 740–745

[18] 左丽丽, 刘美迎, 惠竹梅, 等. 棚膜颜色对避雨栽培酿酒葡萄果实品质的影响[J]. 西北农业学报, 2015, 24(8): 116–122
Zuo L L, Liu M Y, Hui Z M, et al. Effects of different color films on wine grape quality in rain protective covering[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2015, 24(8): 116–122

[19] 李文超, 孙盼, 王振平. 不同土壤条件对酿酒葡萄生理及果实品质的影响[J]. 果树学报, 2012, 29(5): 837–842
Li W C, Sun P, Wang Z P. Effects of different soil condition on physiology and fruit quality of wine grapes[J]. Journal of Fruit Science, 2012, 29(5): 837–842

[20] 王锐, 孙权, 郭洁, 等. 不同灌溉及施肥方式对酿酒葡萄生长发育及产量品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(5): 123–127
Wang R, Sun Q, Guo J, et al. Influence of irrigation and fertilization on the wine grape growth, yield and quality[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(5): 123–127

[21] 房玉林, 孙伟, 万力, 等. 调亏灌溉对酿酒葡萄生长及果实品质的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(13): 2730–2738
Fang Y L, Sun W, Wan L, et al. Effects of regulated deficit irrigation (RDI) on wine grape growth and fruit quality[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(13): 2730–2738

[22] 刘洪光, 何新林, 王雅琴, 等. 调亏灌溉对滴灌葡萄耗水规律及产量的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(6): 109–111
Liu H G, He X L, Wang Y Q, et al. Effects of regulated deficit irrigation on water consumption and yield of grape[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(6): 109–111

[23] 张芮, 成自勇, 李毅, 等. 小管出流亏缺灌溉对设施延后栽培葡萄产量与品质的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 108–113
Zhang R, Cheng Z Y, Li Y, et al. Effects of small tube flow deficit irrigation on yield and quality of greenhouse grape under delayed cultivation[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(20): 108–113